Список литературы: 1. *Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С.* Численный анализ колебаний систем турбоагрегат-фундамент. – Киев: Наукова думка, 1991. – 232 с. **2**. *Степченко А.С.* Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент // Дис. … канд. техн. наук. – Харьков, 1994. – 194 с. **3.** *Жовдак В.О., Красников С.В., Степченко О.С.* Решение задачи статистической динамики машиностроительных конструкций с учетом случайного изменения параметров // Проблемы машиностроения. – Харків: «Контраст». – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 39-47. **4.** *Шейнин И.С., Цейтлин Б.В.* Теоретическое исследование динамических характеристик ряда фундаментов под мощные турбоагрегаты // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. – 1981. – 151. – С. 81-87.

Поступила в редколлегию 07.07.2007

УДК 534.014.1 (09)

А.А.ЛАРИН, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ХАРЬКОВСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ С 1930 ПО 1970 ГОДЫ

У статті представлена історія розвитку методів розрахунків крутильних коливань валопроводів силових установок. Приводиться внесок вчених ХПІ в рішення цього питання у 30 – 70 роки минулого сторіччя.

The history of development of methods to calculate torsion vibrations of shaft power-plants is presented in the article. The contribution of the scientists from KhPI to this subject in the thirties-seventies of last century is described.

Историческая справка. Исследования динамики машин включают определение частот и форм свободных колебаний с целью исключения из рабочего диапазона резонансов. Для валопроводов, передающих вращение от двигателя к потребителю, типичными являются крутильные колебания. Задача их исследования возникла на рубеже XIX и XX веков в связи с увеличением мощности и скорости паровых машин. Поскольку эти машины являются машинами циклического действия с периодически меняющимися силами, в их валопроводах стали появляться крутильные резонансные колебания, часто приводящие к усталостному разрушению [1, с.13]. Не умея вычислить напряжений, обусловленных динамическими причинами, инженеры в сомнительных случаях зачастую просто увеличивали коэффициент запаса прочности. Однако увеличение размеров не всегда ведет к уменьшению напряжений [2, с.13]. В статье «К вопросу о явлении резонанса в валах», опубликованной в 1905 году в известиях Санкт-Петербургского политехнического института, С.П. Тимошенко дал анализ первых работ, посвященных этому вопросу [2, с.13-54]. Среди них он отметил статьи Г. Лоренца, Г. Фрама и Г. Мельвиля. Особенно полное исследование провел Г. Фрам, поставивший целый ряд опытов и обосновавший необходимость проверки конструкции валопровода на возможность резонанса [2, с.24]. С появлением силовых установок с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), имеющими бóльшую скорость и мощность, вопрос об их колебаниях стал более остро [1, с. 171, 3]. В основном задача сводилась к определению собственных частот и форм колебаний. Данная статья посвящена развитию методов решения этой задачи.

Краткое описание задачи. Традиционно для расчетов крутильных колебаний валопровод приводится к системе цепной структуры [3], т.е. рассматривается дискретная модель, состоящая из s абсолютно твердых дисков с осевыми моментами инерции I_j, соединенных невесомыми упругими участками с крутильными жесткостями c_j. В матричной форме система уравнений, описывающая свободные колебания линейной системы без сопротивления выглядит так [4, с.96]

$$\mathbf{I}\ddot{\vec{\varphi}} + \mathbf{C}\vec{\varphi} = 0\,. \tag{1}$$

Здесь $\vec{\varphi}$ – матрица-столбец (вектор) обобщенных координат, которыми являются углы поворота дисков вокруг оси вала (φ_j), $\mathbf{I}$ – матрица инерции размерности $s{\times}s$ (поскольку уравнения записываются в прямой форме, то матрица инерции диагональная), $\mathbf{C}$ – матрица жесткости той же размерности. Частное решение системы (1) ищется в виде

$$\vec{\varphi} = \vec{A}\sin\left(kt + \varepsilon\right) \tag{2}$$

и описывает моногармонический колебательный режим с частотой k, одинаковой для всех обобщенных координат. Подставив (2) в (1), получим систему алгебраических уравнений

$$\left(\mathbf{C} - \mathbf{I}k^2\right)\vec{A} = 0\,, \tag{3}$$

которая является однородной относительно вектора неизвестных амплитуд $\vec{A}_j = \{\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \ldots \alpha_{sj}\}$. Так как при колебаниях системы все амплитуды не могут равняться нулю, то

$$\det\left(\mathbf{C} - \mathbf{I}k^2\right) = 0\,. \tag{4}$$

(4) представляет собой уравнение s-й степени относительно k^2 и называется уравнением частот или вековым уравнением. Его корни, образующие спектр собственных частот, принято располагать в порядке возрастания $k_1 < k_2 < \ldots < k_s$.

При подстановке в систему (1) какого-либо j-го корня частотного уравнения, одно из уравнений станет следствием остальных, то есть независимых уравнений останется s-1. Эти уравнения связывают между собой s амплитуд

$\vec{A}_j$ и позволяют выразить все амплитуды через какую-либо одну из них. Совокупность отношений амплитуд описывает конфигурацию системы при наибольшем ее отклонении от положения равновесия при свободных колебаниях с j–й собственной частотой, не зависят от начальных условий, а определяются параметрами системы и называются собственными формами колебаний. В случае одномерной системы эти коэффициенты являются безразмерными величинами и, поскольку масштаб каждой из собственных форм произвольный, обычно максимальный из коэффициентов берут равным единице, а остальные вычисляют.

Способы вычисления собственных частот и форм колебаний. Сложность задачи о свободных колебаниях линейных систем заключалась в том, что для векового уравнения, степень которого выше четырех, не существует формул, которые выражали бы величины корней через коэффициенты уравнения [5, с.18]. Кроме того, вековое уравнение, представляющее собой раскрытый определитель (4) содержит s! слагаемых, например для системы с 10-ю степенями свободы их будет 3628800. Задача облегчается, если уравнения записываются в прямой или обратной форме, и тогда в определителе (4) собственная частота присутствует только в диагональных элементах. Например, определитель (4), построенный для свободных крутильных колебаний валопровода имеет вид

$$\begin{vmatrix} c_{11} - I_1 k^2 & c_{12} & \cdots & c_{1s} \\ c_{21} & c_{22} - I_2 k^2 & \cdots & c_{2s} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{s1} & c_{s2} & \cdots & c_{ss} - I_s k^2 \end{vmatrix} = 0\,, \qquad (5)$$

где c_{ij} – упругие коэффициенты, зависящие от крутильных жесткостей системы и ее структуры, а I_j – моменты инерции тел.

В работе [5] А. Н. Крылов критически проанализировал существовавшие ранее методы, нашел их «сложными и неудобными» и предложил свой метод, не требующий развертывания определителя векового уравнения. В результате преобразований определителя, он принимает такой вид, что k^2 фигурирует только в первом столбце. Метод А.Н. Крылова требует значительно меньшего числа операций.

Харьковский ученый А.М. Данилевский* в 1937 году предложил метод, основанный на приведении определителя (4) к так называемой форме Фробениуса [7].

---

* Александр Михайлович Данилевский (1906-?) – Харьковский ученый, погиб при оккупации Харькова в годы Великой Отечественной войны.

$$\begin{vmatrix} h_{11}-k^2 & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1s-1} & h_{1s} \\ 1 & -k^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -k^2 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -k^2 \end{vmatrix} = 0. \qquad (6)$$

Из определителя (6) легко получаем степенное вековое уравнение

$$k^{2s} - h_{11}k^{2(s-1)} + h_{12}k^{2(s-2)} - \ldots - h_{1s-1}k^2 + h_{1s} = 0. \qquad (7)$$

Приведение к форме Фробениуса может быть выполнено самыми простыми средствами с достаточной для практики точностью и при достаточно большом числе степеней свободы требует в полтора раза меньше операций, чем метод Крылова. Задачу определения частот и форм свободных колебаний можно также рассматривать как задачу линейной алгебры и решать численно. Переписав равенство (3) в виде

$$\mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{C}\vec{A} = k^2\vec{A}, \qquad (8)$$

заметим, что матрица-столбец $\vec{A}$ является собственным вектором матрицы

$$\mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{C}, \qquad (9)$$

а k^2 ее собственным значением.

Решение проблемы собственных значений и векторов является одной из самых привлекательных задач численного анализа [8, с.173]. При этом для решения всех задач, встречающихся на практике, нельзя предложить единого алгоритма. Выбор алгоритма зависит от вида матрицы, а также от того, нужно ли определять все собственные значения или только наименьшие (наибольшие) или близкие к данному числу. В 1846 г. Карл Густав Якоб Якоби для решения полной проблемы собственных значений предложил в статье «Über ein leichtes Verfahren, die in der Theorie der Säkularstorungen Vorkommenden Gleichungennumerisch aufzulösen» итерационный метод вращений [8, с. 182]. Метод основан на такой бесконечной последовательности элементарных вращений, которая в пределе преобразует матрицу (9) в диагональную. Диагональные элементы полученной матрицы и будут искомыми собственными значениями. Однако для определения собственных значений требуется $30n^3$ арифметических операций, а для собственных векторов еще $20n^3$ операций [9, с.181]. В связи с этим метод в XIX веке не нашел применения и был забыт более чем на сто лет.

Определить первую собственную частоту консервативной системы можно по методу Рэлея:

$$k_1^2 = \Pi_{max}\big/T^*_{max}, \text{ где } T^*_{max} = T_{max}\big/k^2. \qquad (10)$$

При этом для вычисления максимальных значений потенциальной (П) и кинетической (T) энергий берется некоторая форма колебаний. Если она совпадет с первой формой колебаний системы, мы получим точное значение первой собственной частоты, а в противном случае это значение всегда завышено [4, с.174].

Для решения задачи о свободных колебаниях валов, представляющих собой цепные неразветвленные системы немецкий ученый Толле в 1921 году в работе «Regelung der Kraftmashinen» предложил метод остатков, заключающийся в последовательном вычислении значений левой части векового уравнения (4) для пробных собственных значений [4, с. 223, 8, с.78]. Эти вычисления проводятся по определенной схеме (таблицы Толле). Номер полученной в результате собственной частоты определяется по числу перемен знака формы колебаний, которое должно быть на единицу меньше номера частоты. Записав таблицы Толле в матричной форме, мы придем к методу начальных параметров [4, с. 223]. Основным же недостатком метода Толле является невозможность его применения к более сложным разветвленным системам без их предварительного преобразования [10, с. 441].

Развитие теории крутильных колебаний в ХПИ. Приближенными вычислениями собственных частот в основном крутильных систем занимался с 1934 года профессор И.М. Бабаков*. Он предложил записывать дифференциальные уравнения крутильных колебаний в обратной форме [11, с.55]

$$\varphi_i = -\sum_{j=1}^{s} \delta_{ij} \ddot{\varphi}_j \qquad i = 1,2,...,s\,. \tag{11}$$

Подстановка решения (2) в (11) приводит задачу к системе алгебраических уравнений

$$\alpha_i = k^2 \sum_{j=1}^{s} \delta_{ij} \alpha_j\,, \qquad i = 1,2,...,s\,. \tag{12}$$

Метод, предложенный И.М. Бабаковым, основан на приближении не частотами (как у Толле), а формами колебаний. Для его применения зададимся системой s положительных чисел $\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, ..., \alpha_s^{(0)}$ (исходная форма) и вычислим первое приближение

$$\alpha_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{s} \delta_{ij} \alpha_j^{(0)}\,, \qquad i = 1,2,...,s\,. \tag{13}$$

Затем процесс приближений $\alpha_1^{(m)}, \alpha_2^{(m)}, ..., \alpha_s^{(m)}$ продолжим по формуле (13), записывая каждый раз неравенство

$$\min \alpha_i^{(m-1)} / \alpha_i^{(m)} < k_1^2 < \max \alpha_i^{(m-1)} / \alpha_i^{(m)}\,, \qquad i = 1,2,...,s\,. \tag{14}$$

В работе [11, с.58-59] приводятся доказательства двух теорем о сходи-

---

* Иван Михайлович Бабаков (1890-1974) – профессор, заведующий кафедрой теоретической механики ХПИ с 1925 по 1960 гг.

мости решения, описываемого неравенством (14) к точному значению первой собственной частоты.

Третья теорема [11, с.63] устанавливает более точную верхнюю границу первой собственной частоты с учетом формулы Рэлея (10)

$$k_1^2 < \sum_{i=1}^{s} \alpha_i^{(0)} \alpha_i^{(m-1)} \bigg/ \sum_{i=1}^{s} \alpha_i^{(0)} \alpha_i^{(m)} . \tag{15}$$

Метод последовательных приближений формами колебаний можно применить к определению и высших частот. Для этого И.М. Бабаков предложил исключить с помощью условия ортогональности собственных форм одну искомую амплитуду, сведя тем самым задачу к системе с s-1 степенью свободы, основная частота которой будет второй частотой исходной системы [12, с. 111].

Однако самую высшую собственную частоту методом последовательных приближений можно определить и сразу. Для этого в качестве обобщенных координат используются углы закручивания отдельных участков валопровода. Переходя к обратным величинам $p^2 = 1 / k^2$, строим аналогичный алгоритм, причем все теоремы о границах собственных частот распространяются и на этот случай [13, с.77]. Полученное решение позволяет определить наивысшую собственную частоту $k_s^2 = 1/p_1^2$. В своих исследованиях И.М. Бабаков показал, что удовлетворительные для практических задач результаты получаются уже при втором приближении формами колебаний. При этом, по крайней мере для систем размерностью до 12 степеней свободы, требуемое количество операций меньше, чем в методе Толле [12, с.122]. Впоследствии И.М. Бабаков обобщил свой метод на другие виды систем и привел его в учебнике «Теория колебаний» [4].

В 1950-е годы, наряду с вышеизложенными методами, широкое распространение получил метод цепных дробей, предложенный ленинградским ученым профессором В.П. Терских [14]. Метод заключается в том, что уравнение частот записывается в виде непрерывной дроби. s корней данного уравнения, то есть собственные частоты определяются последовательными пробами. В отличие от метода Толле, метод цепных дробей пригоден и для разветвленных систем.

Вслед за И.М. Бабаковым, крутильными колебаниями валопроводов занимался один из его учеников профессор Л.И. Штейнвольф*. Он руководил в 1960-1980-е годы научной группой, где наряду с другими задачами изучались крутильные колебания валопроводов ДВС. Работы в этом направлении выполнялись в основном для Харьковского завода транспортного машиностроения имени В.А. Малышева (ХЗТМ).

В 1960-е годы в практику расчетов стало входить применение ЭВМ.

* Лев Израилевич Штейнвольф (1916-1991) – докт.техн.наук, профессор кафедры теоретической механики ХПИ

Однако возможности машин были еще очень ограничены, поэтому долго определение собственных частот и форм колебаний проводилось с помощью различных приближенных методов. Так, например, в расчетах свободных колебаний приводов вспомогательных механизмов тепловоза, выполненных для ХЗТМ, рассматривается система с девятью степенями свободы [15]. Для проведения ручных расчетов по методу В.П. Терских или методу остатка эта система весьма громоздка, поэтому расчеты осуществлялись на ЭЦВМ Урал-2. Сначала вручную с помощью калькулятора определялись параметры матриц жесткости и инерции, а затем применялась стандартная программа (СП) степенного метода в сочетании с понижением. При расчетах данным методом определяются все собственные частоты, начиная с высшей. Поскольку при вычислениях накапливается ошибка, вычислительный процесс проводился, также начиная с низшей частоты. Для этого делалось обращение матриц уравнений. Контролем правильности счета являлось совпадение частот и форм исходной и обращенной матриц [15, с. 13].

Метод Терских мог применяться для проведения расчетов с помощью ЭВМ, однако в ходе расчета могло потребоваться вмешательство оператора, так как уравнение в форме цепной дроби представляет собой разрывную функцию частоты [16, с.107]. Большой вклад в компьютерную реализацию метода Терских внес А.П. Филиппов*. В монографии [17] он описывает программу расчета собственных частот для разветвленной системы с 96 степенями свободы. Такая высокая для того времени размерность рассматриваемой системы делала метод цепных дробей конкурентоспособным и после распространения методов матричной алгебры.

Дальнейшее развитие вычислительной техники позволило решить полную проблему собственных значений и собственных векторов с помощью итерационных методов, что, хотя и не сразу, позволило отказаться от всех вышеизложенных методов расчета. Так в 1952 г. был вновь открыт метод вращений Якоби. В работах [18, 19] разработан вычислительно ориентированный метод Якоби. Однако достаточно высокая трудоемкость данного метода заставило математиков искать новые алгоритмы. В статье [16, с.108] Л.И. Штейнвольф обосновал применение для расчета собственных частот и форм крутильных колебаний QR-алгоритма, предложенного в 1961 г. В.Н. Кублановской [20] и Дж. Френсисом [21]. Этот алгоритм основан на преобразовании матрицы к треугольной форме и оказался эффективнее метода вращений Якоби. Однако для ЭВМ 1970-х годов ограничения по быстродействию и по объему памяти оставались существенны, например, машина М-222 позволяла рассматривать только системы не выше 26-го порядка [22, с.16]. В связи с этим при решении задач синтеза или оптимизации колебательных сис-

* Анатолий Петрович Филиппов (1899-1978) – академик АН УССР, профессор, заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин» ХПИ с 1948 по 1960 гг.

тем, где задача анализа решается многократно, исследователю приходилось уменьшать порядок системы, выделяя в ней только часть спектра собственных частот [23].

Решение полной проблемы собственных значений существенно упростило задачи о свободных колебаниях линейных дискретных систем, особенно для цепных систем, для которых дифференциальные уравнения этих колебаний очень легко строятся в прямой форме. Наибольшей трудоемкости при этом требует заполнение вручную матриц инерции и жесткости системы уравнений (3). Поэтому с начала 1970-х годов под руководством Л.И. Штейнвольфа разрабатываются методы автоматического построения систем уравнений. В статье [24] рассматривается автоматическое построение дифференциальных уравнений колебаний в прямой форме для цепных линейных систем с помощью структурных матриц. Записав обратные структурные матрицы легко можно составить уравнения колебаний и в обратной форме [24, с.7]. Применение аппарата структурных матриц для консервативных систем позволило уточнить ряд теорем теории колебаний, касающихся спектральных свойств дискретных систем [25, с. 18]. Дальнейшее развитие аппарата структурных матриц привело к созданию программного комплекса КИДИМ [26, 27], позволяющего автоматически строить математические модели, описывающие движение дискретных механических систем сложной структуры с произвольными связями. Комплекс основан на специально созданной системе компьютерной алгебры, формирующей уравнения движения по аналитическому описанию механической модели, и позволяет оперативно варьировать не только параметры системы, но ее структуру. Современное состояние теории колебаний и применяемых для их расчетов средств не требует выделения расчетов крутильных колебаний в отдельный класс задач.

Список литературы: **1.** *Крылов А.Н.* Вибрация судов. т. X собрания трудов. – М-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 403 с. **2.** *Тимошенко С.П.* Прочность и колебания элементов конструкций. – М.: Наука, 1975. – 704 с. **3.** *Терских В.П.* Расчеты крутильных колебаний силовых установок. – Машгиз, 1954. – 560 с. **4.** *Бабаков И.М.* Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 560 с. **5.** *Крылов А.Н.* Лекции о приближенных вычислениях. – М-Л.: Издательство академии наук СССР, 1935. – 541 с. **6.** *Крылов А.Н.* О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем // Изв. АН СССР. – 1931. – № 4. – С. 491-539. 7. *Данилевский А.М.* О численном решении векового уравнения. – Матем. Сб., 2 (44). – 1937. – С. 169 -172. **8.** *Уилкинсон, Райнш* Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. – М.: Машиностроение, 1976. – 389 с. **9.** *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с. **10.** *Филиппов А.П.* Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с. **11.** *Бабаков И.М.* О границах основной частоты малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы // Научные записки ХММИ. – Т. V. – 1940. – С. 55-74. **12.** *Бабаков И.М.* К расчету высших частот крутильных колебаний // Журнал Прикладная математика и механика. – Т. V, вып. 1. – М: ИМ АН СССР, 1941. – С.109-124. **13.** *Бабаков И.М.* К определению наибольшей частоты малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы // Научные записки ХММИ. – Т. V. – Харьков, 1940. – С. 75-84. **14.** *Терских В.П.* Метод цепных дробей. – М.: Судпромгиз, 1955. – 420 с. **15.** Динамические расчеты приводов вспомогательных механизмов тепловоза / Отчет по теме № 490П/171/67. – Харьков, 1967. – 30 с. **16.** *Штейнвольф Л.И.* Об алгоритмах расчета свободных крутильных колебаний на ЭЦВМ // Динамика и прочность машин. – 1967. – Вып. 6. – С. 106-109. **17.** *Филиппов А.П.* Колебания механических систем. – К.: Наукова думка, 1965. – 456 с. **18.** *Gregory R.T.* Computing Eigenvalues and Eigenvectors of a Symmetric matrixon the ILLIAC // Math. Tab. And other Aids to Comp., 7. – 1953. – PP. 215-220. **19.** *Pope D.A., Thompkins C.* Maximizing Functions of Rotations-Experiments Concerning Speed of Diagonalisation of Symmetric Matrices Using Jacobi's Method. J. Assoc. Comput. Machinary, 4. – 1957. – PP. 459-466. **20.** *Кублановская В.Н.* О некоторых алгоритмах для решения полной проблемы собственных значений // Вычислительная математика и математическая физика. – Т. 1, № 4. – 1961. – С. 555-570. **21.** *Francis J.G.F.* The QR-transformation – a Unitary Analoque to the LR-transformation, Parts I, II. Comput. J. 4, pp. 265-271, 1961, pp. 332-345, 1962. **22.** Диагностика рабочего процесса транспортного двигателя / Отчет по теме № 21861. – Харьков, 1981. – 184 с. **23.** *Драгун С.В., Карабан В.Н., Штейнвольф Л.И.* Оптимизация моделей силовых передач в динамических расчетах // Проблемы машиностроения. – Вып. 17. – 1982. – С. 66-70 **24**. *Митин В.Н., Штейнвольф Л.И.* Структурные матрицы цепных вибрационных систем // Динамика и прочность машин. – Вып. 17. – С. 3-7. **25.** *Митин В.Н.* Спектральные свойства и синтез цепных вибрационных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1975. – 19 с. **26.** *Андрєєв Ю.М., Ларін А.О. Морачковський О.К.* Система комп'ютерної алгебри для досліджень механіки машин // Машинознавство. – 2005. – № 7(95). – С. 3-8. **27.** *Андреев Ю.М., Морачковский О.К.* О динамике голономных систем твердых тел // Прикладная механика. – 2005. – 41, № 7. – С. 130-138.

Поступила в редколлегию 22.05.2006

УДК 539.434

Г.И.ЛЬВОВ, докт.техн.наук; ***С.В.ЛЫСЕНКО***, канд.техн.наук;
Е.Н.ГОРАШ; НТУ «ХПИ»

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ КЛАПАНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Розглянуто неізотермічну теорію довготривалої міцності на основі механіки руйнування суцільних середовищ. Модель Качанова-Работнова-Хейхерста розширена до варіанту, що враховує перемінну температуру. Обидві швидкості, як деформації, так і пошкоджуваності, доповнені температурними залежностями Арреніуса. Неізотермічна модель повзучості з урахуванням пошкоджуваності вбудовується до скінчено-елементного коду універсального пакету для інженерних розрахунків АБАКУС. Виконано чисельний розрахунок довготривалої міцності тривимірної моделі корпусу перепускного клапану парової турбіни. Визначено час руйнування і закономірності перерозподілу в корпусі клапана основних параметрів повзучості і пошкоджуваності.

The unisothermal theory of long-term strength is considered on the basis of continuum damage mechanics. The model of Kachanov-Rabotnov-Hayhurst is extended to the case of variable temperature. Both the creep and the damage rates are complemented by temperature dependences of Arrenius. The resulting non-isothermal creep-damage constitutive model is incorporated into the FE-code of the universal CAE-system ABAQUS. The numeral calculation of long-term strength of three-dimensional model of corps of bypass valve of steam turbine is executed. The time rupture and the law of redistribution in the corps of valve of basic parameters of creep and damage are determined.